العدد 06

علوم الطبيعة والحياة

التركيب الضوئي

معلومات شاملة، دقيقة، سهلة الفهم والحفظ
رسومات تخطيطية نموذجية للامتحان بخط اليد

مجلة المجتهد

إعداد الأستاذ: بن خريف مصطفى
ثانوية الرائد بعرير محمد العربي بعين الملح - المسيلة

مراجعة الأستاذ: بوالريش أحمد
ثانوية: متقن القل - سكيكدة

التحضير الجيد للبكالوريا

مقدمة

تتواجد الطاقة في الطبيعة على عدة أشكال وتتحول من شكل لآخر. يقوم النبات الأخضر بعملية التركيب الضوئي لتحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية كامنة في الجزيئات العضوية التي يركبها.

المحاور الرئيسية لهذه الظاهرة ثلاثة وهي:

- الصانعة الخضراء: مقر التركيب الضوئي.
- اليخضور: الجزيئة المسؤولة عن التقاط الطاقة الضوئية.
- مراحل التركيب الضوئي: مرحلة كيموضوئية ومرحلة كيموحيوية.

مخطط الوحدة

1- مراجعة

1- النباتات الخضراء

1- النباتات الخضراء كائنات ذاتية التغذية: لأنها تركب المواد العضوية اللازمة لنموها وتكاثرها انطلاقا من مواد أولية (معدنية) تتمثل في: الماء (H_2O)، الأملاح وثاني أوكسيد الكربون (CO_2)، وذلك بفضل عملية التركيب الضوئي.

2- النباتات الخضراء بوابة دخول الطاقة للعالم الحي: لأنها تمتص الطاقة الضوئية (مصدرها الشمس) وتخزنها في جزيئات عضوية تعتمد عليها حياة كل الكائنات الأخرى، فهي المنتج الأول في كل السلاسل الغذائية.

ملاحظة: بفضل عملية التركيب الضوئي، النبتة الصغيرة تصبح شجرة عملاقة.

3- الخلية النباتية: تتميز الخلية النباتية باحتوائها عضية خاصة تسمى الصانعة الخضراء (بلاستيدة)، والتي تحتوي بدورها على جزيئات قادرة على امتصاص الطاقة الضوئية تسمى: اليخضور.

معلومات

- تحدث عملية التركيب الضوئي أساسا على مستوى الأوراق، ويمكن أن تحدث كذلك في الساق والأغصان.

- تحتوي الخلية النباتية عموما من 20 إلى 40 صانعة خضراء.

2- التركيب الضوئي

1- تعريف: ظاهرة حيوية تقوم بها الخلية النباتية على مستوى الصانعات الخضراء، يتم فيها تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية كامنة في الجزيئات العضوية.

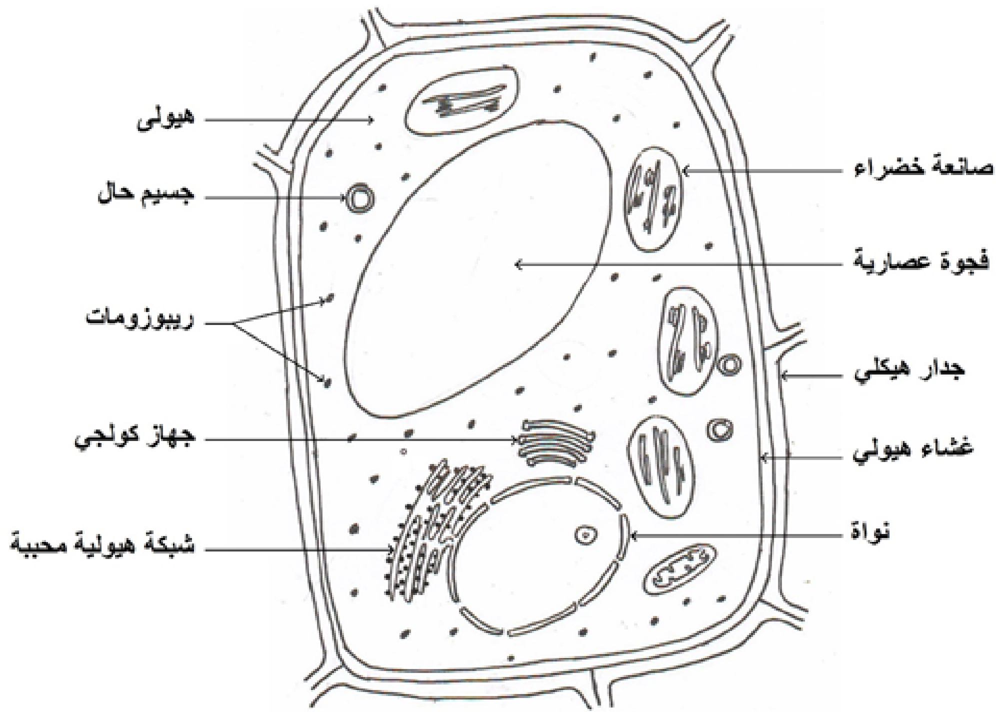
2- شروط: الشروط هي العوامل الضرورية لحدوث الظاهرة، بحيث تتوقف في غياب أحدها.

- تتطلب عملية التركيب الضوئي أربعة (04) شروط وهي: يخضور، ضوء، CO_2، H_2O.



3- مظاهر: المظاهر هي التغيرات المشاهدة أثناء حدوث الظاهرة.

- مظاهر عملية التركيب الضوئي أربعة (04) وهي: امتصاص الـ CO_2، طرح ثاني الأكسجين (O_2)، امتصاص الـ H_2O، تركيب المادة العضوية (سكريات).



تعضي الخلية النباتية

2- مقر التركيب الضوئي

1- بنية الصانعة الخضراء

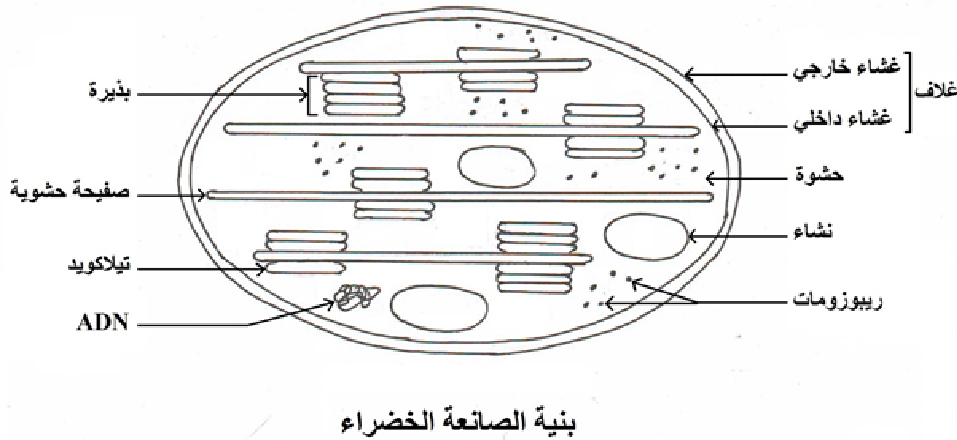
عضية ذات شكل بيضوي يحيط بها غشائين خارجي وداخلي، يشكل الغشائين معا غلاف الصانعة. تحتوي على سائل يسمى الحشوة أو ستروما. تحتوي الحشوة على صفائح حشوية وكييسات (تيلاكويدات). تتوضع الكييسات فوق بعضها وتشكل البذيرة أو الغرانا. تحتوي الحشوة كذلك على حبيبات نشوية، جزيئات ADN، وريبوزومات.

البنيية الحجيرية: تتميز الصانعة الخضراء ببنية حجيرية لأنها مقسمة إلى ثلاث فراغات: المسافة بين الغشائين، التجويف الذي تملؤه الحشوة وتجويف الكييسات.

أهمية البنية الحجيرية: احتواء الصانعة على ثلاثة حجرات يسمح بتوفير ثلاثة أوساط مختلفة من حيث التركيب الكيموحيوي ودرجة الحموضة (pH).

- **التركيب الكيموحيوي:** الحشوة وتجويف التيلاكويد لا يحتويان على نفس العناصر (جزيئات عضوية، شوارد، انزيمات...)، أو نفس العنصر بتركيز مختلف مثل البروتونات (H^+).

- **الـ pH:** يتميز كل تجويف بـ pH معين ملائم لنشاط انزيمات مختلفة.



بنية الصانعة الخضراء

ملاحظة: الصانعات الخضراء المعرضة للضوء تحتوي على حبيبات النشاء، والغير معرضة للضوء لا تحتويها. ونكشف عن النشاء باستعمال الكاشف ماء اليود الذي يلونه بالأزرق البنفسجي.



معلومة: لماذا تحتوي الصانعة الخضراء على غشائين داخلي وخارجي؟

يفسر ذاك بنظرية التعايش الداخلي: كانت الخلية النباتية البدائية لا تحتوي على صانعة خضراء، وكانت الصانعة عبارة عن بكتيريا يخضورية مستقلة. اندمجت هذه البكتيريا مع الخلية البدائية وأصبحت أحد عضياتها، فاكتسبت بالإضافة إلى غشائها الداخلي (مماثل لغشاء التيلاكويد) الغشاء الخارجي (مماثل للغشاء الهيولي). وما يدعم هذه النظرية احتواء الصانعة على عدة جزيئات ADN تحمل مئات المورثات تجعلها مستقلة جزئيا عن النواة.

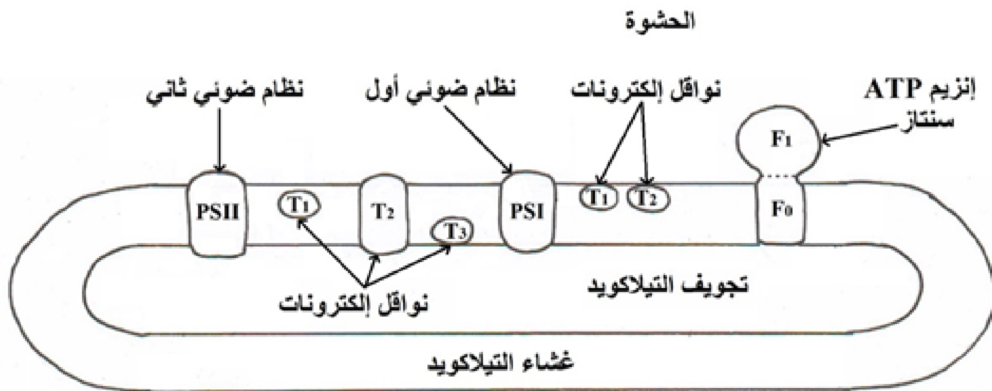
2- التركيب الكيموحيوي للصانعة الخضراء

1- التيلاكوييد: تحتوي أغشية التيلاكويد على أصبغة التركيب الضوئي (أصبغة اليخضور، أصبغة أشباه الجزرين)، نواقل الالكترونات، إنزيم NADP ريدوكتاز وإنزيم ATP سنتاز.

2- الحشوة: تحتوي على مواد أيضية وسيطة لتركيب الجزيئات العضوية، مرافقات انزيمية، وعدة انزيمات أهمها الريبولوز ثنائي الفوسفات كربوكسيلاز Rubisco.

ملاحظة: التركيب الكيموحيوي لكل من التيلاكويد والحشوة مختلف، وبالتالي لكل منهما دور مختلف في عملية التركيب الضوئي.

3- بنية غشاء التيلاكويد: يتكون غشاء التيلاكويد من طبقة فوسفوليبيدية مضاعفة تحتوي على: نظامين ضوئيين PSI وPSII، خمسة نواقل للألكترونات (T_1، T_2، T_3، T'_1، T'_2)، إنزيم NADP ريدوكتاز وإنزيم ATP سنتاز. يسمى مجموع هذه المركبات بالسلسلة التركيبية الضوئية.



بنية التيلاكويد / غشاء التيلاكويد

3- شدة التركيب الضوئي

1- قياس الشدة

نعبر عن شدة التركيب الضوئي بطريقتين: إما بكمية الـ O_2 المنطلق أو الـ CO_2 الممتص.

2- تأثير ألوان الضوء

الضوء الأبيض المرئي: الضوء الأبيض الذي نراه بالعين المجردة مزيج من سبعة أطياف محصورة بين طول الموجة 400 نانو متر (البنفسجي) و700 نانومتر (الأحمر) وهي: البنفسجي، الأزرق النيلي، الأخضر، البرتقالي، الأصفر والأحمر.

معلومات: الضوء، طول الموجة، الفوتون

- الضوء عبارة عن طاقة كهرومغناطيسية تنتشر على شكل أمواج متماثلة بسرعة كبيرة.
- المسافة التي تفصل بين موجتين تسمى طول الموجة.
- يتركب الضوء من عناصر دقيقة تحمل كمية من الطاقة تسمى الفوتونات.
- عند وصول الإشعاعات من الشمس، يسمح الغلاف الجوي بمرور الضوء الأبيض المرئي فقط، ويعكس الاشعاعات المضرة بالكائنات الحية، مثل الأشعة تحت الحمراء (IR) وفوق البنفسجية (UV). هذه الاشعاعات تضر بالجزيئات العضوية مثل الأحماض النووية.

3- طيف الامتصاص وطيف النشاط

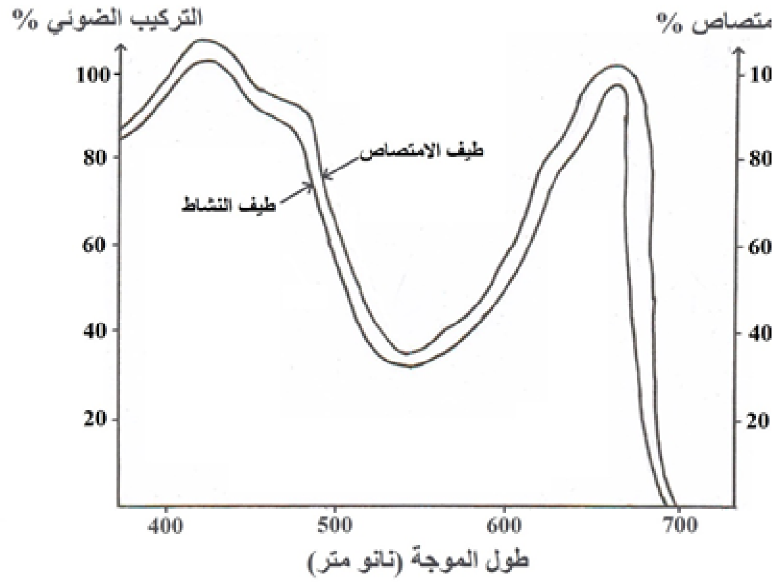
1- طيف الامتصاص: هو منحنى تغير شدة امتصاص الضوء بدلالة طول الموجة.

- نقيس شدة الامتصاص باستعمال جهاز المطياف الضوئي.

2- طيف النشاط: هو منحنى تغير شدة التركيب الضوئي بدلالة طول الموجة.

- نقيس شدة التركيب الضوئي باستعمال ExAO، حيث نعرض محلول من الصانعات الخضراء في كل مرة لأحد أطياف الضوء ونقيس امتصاص الـ O_2 أو طرح الـ CO_2.





طيف الامتصاص وطيف النشاط

تحليل مختصر: يوجد تطابق (تشابه، تماثل) بين طيف الامتصاص وطيف النشاط (تناسب طردي)، بحيث كل منهما كبير في مستوى الاشعاعات الطرفية، ضعيف في مستوى الاشعاعات الوسطية، ويكاد ينعدم عند الاشعاع الأخضر.

الاستخلاص: الإشعاعات الأكثر امتصاصا من طرف اليخضور هي الأكثر فعالية في عملية التركب الضوئي.

معلومات: صبغة اليخضور وامتصاص الفوتونات الضوئية

- تسمى بصبغة لأنها قادرة على امتصاص الضوء.

- أوراق الأشجار خضراء، لأن جزيئة اليخضور تمتص كل أطياف الضوء، وتعكس الطيف الأخضر.

- عدم امتصاص صبغة اليخضور للطيف الأخضر يعود لتركيبها الكيميائي. فكل جزيئة تمتص فوتونات لطول موجة معينة فقط (الفوتونات تختلف من حيث كمية الطاقة).

- كل طيف يتركب من فوتونات تحمل كمية مختلفة من الطاقة، بحيث كلما قل طول الموجة زادت طاقة الفوتون.

4- أصبغة التركيب الضوئي

تتمثل أصبغة التركيب الضوئي في الجزيئات: اليخضور أ، اليخضور ب وأشباه الجزرين. هذه الأصبغة لها نفس الدور ويتمثل في امتصاص الفوتونات الضوئية، ولكن نتكلم غالبا عن اليخضور لأنه يمثل النسبة الأكبر منها. تتواجد هذه الأصبغة في غشاء التيلاكويد.

معلومة: الصيغة العامة لليخضور أ ($C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$)، واليخضور ب ($C_{55}H_{70}O_6N_4Mg$).

1- امتصاص الفوتونات الضوئية

تجربة التفلور (الاستشعاع)

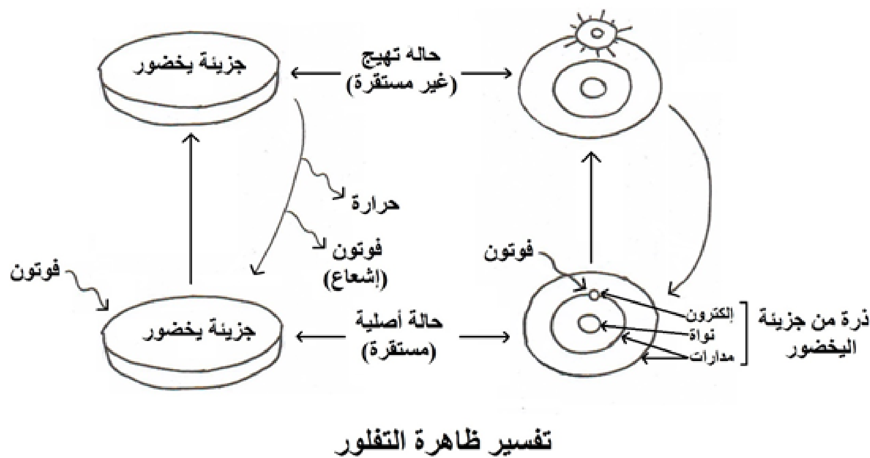
أهميتها: إظهار امتصاص اليخضور للفوتونات الضوئية.

1- **تجربة:** نعرض وعاء زجاجي يحتوي على محلول اليخضور الخام للضوء الأبيض.

2- **ملاحظة:** عند مشاهدة الوعاء من الجانب بالعين المجردة، يظهر المحلول بلون أحمر، يسمى هذا بظاهرة الاستشعاع.

3- **تفسير:** تمتص جزيئة اليخضور فوتونا ضوئيا، فينتقل إلكترون أحد ذراتها من مداره الأصلي إلى مدار ذو مستوى طاقوي أعلى، وتصبح جزيئة اليخضور في حالة تهيج. بعد زمن قصير جدا، يعود الالكترون تلقائيا إلى مداره الأصلي، يحرر الطاقة المكتسبة على شكل إشعاع أحمر وحرارة، وتعود جزيئة اليخضور إلى حالة الاستقرار.

4- **نتيجة:** جزيئة اليخضور تمتص الفوتونات الضوئية.



تفسير ظاهرة التفلور

2- النظام الضوئي

1- بنية النظام الضوئي: يتواجد النظام الضوئي ضمن غشاء التيلاكويد، وهو معقد بروتيني يحتوي على أصبغة التركيب الضوئي (اليخضور وأشباه الجزرين). عدد كبير منها يشكل أصبغة هوائية، وزوج خاص من اليخضور أ يشكل مركز التفاعل.

2- آلية عمل النظام الضوئي: الأكسدة الضوئية لليخضور

(نص) تستقبل صبغة هوائية فوتونا ضوئيا فتتهيج وينتقل الكترون أحد ذراتها من مدار داخلي إلى مدار خارجي. يعود الالكترون إلى مداره الأصلي محررا منه الطاقة المكتسبة فتنتقل إلى صبغة هوائية مجاورة فتهيجها وهكذا... تصل هذه الطاقة إلى صبغة مركز التفاعل فتتهيج بدورها وتحرر الكترونا غنيا بالطاقة ويتأكسد النظام الضوئي.

- **دور الأصبغة الهوائية:** تلتقط الفوتونات الضوئية وتنقل طاقتها لأصبغة مركز التفاعل.

- **دور أصبغة مركز التفاعل:** تتجمع فيها الطاقة الملتقطة من مختلف الجزيئات الهوائية وتتأكسد محررة إلكترون غني بالطاقة.

- **دور النظام الضوئي:** يقتنص الطاقة الضوئية ويتأكسد ويحرر إلكترونين غنيين بالطاقة.

ملاحظة: لماذا لا نشاهد ظاهرة الاستشعاع في أوراق النباتات؟

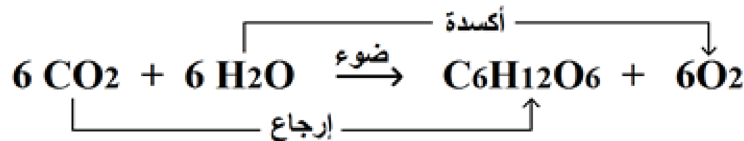
طبيعيا: في الصانعة الخضراء وبالضبط في الأنظمة الضوئية حيث يتم امتصاص الضوء، يوجد مستقبل للالكترونات الغنية بالطاقة المتحررة، تستقبل الالكترون المتحرر من مركز التفاعل وتدخله في تفاعلات المرحلة الكيموضوئية (لا يوجد ضياع للطاقة). هذا المستقبل يسمى $NADP^+$ وسنتعرف عنه لاحقا.

تجريبيا (تجربة التفلور): في محلول اليخضور الخام حيث أغشية التيلاكويد مخربة، لا يوجد مستقبل للالكترون، فيعود الالكترون إلى مداره الأصلي محررا الطاقة الممتصة على شكل اشعاع أحمر (ضياع للطاقة).

5- مراحل التركيب الضوئي

1- مراحل التركيب الضوئي

طبيعة تفاعلات عملية التركيب الضوئي هي أكسدة إرجاع: أكسدة الـ H_2O وإرجاع الـ CO_2، وفق المعادلة التالية:



من هذه المعادلة، كذلك أن عملية التركيب الضوئي تحدث في مرحلتين:

- مرحلة أولى يتم فيها أكسدة الماء تسمى: مرحلة كيموضوئية.

- مرحلة ثانية يتم فيها إرجاع ثاني أوكسيد الكربون تسمى: مرحلة كيموحيوية.

ملاحظة: المرحلة الكيموضوئية تشترط الضوء، بينما المرحلة الكيموحيوية تحدث في وجود الضوء وفي غيابه.

تعليل مقر كل مرحلة

بالاعتماد على المبدأ: التركيب الكيموحيوي يحدد الوظيفة، يمكن تحديد مقر مرحلتي التركيب الضوئي في الصانعة الخضراء:

1- المرحلة الكيموضوئية: يحتوي غشاء التيلاكويد على أنظمة ضوئية بها جزيئات اليخضور القادرة على اقتناص الفوتونات الضوئية. كما يحتوي على نواقل تنقل الإلكترونات خلال تفاعلات الأكسدة. هذا دليل على أنه مقر تفاعلات أكسدة (مرحلة كيموضوئية).

2- المرحلة الكيموحيوية: تحتوي الحشوة على مواد الأيض الوسيطة لتركيب المواد العضوية: نواقل البروتونات والـ ATP وعدد من الإنزيمات كـ Rubisco. هذا دليل على أنها مقر تفاعلات إرجاع (مرحلة كيموحيوية).

6- المرحلة الكيموضوئية

1- تعريف المرحلة الكيموضوئية: سلسلة من تفاعلات الأكسدة والإرجاع تحدث في غشاء التيلاكويد وتتطلب طاقة مصدرها الفوتونات الضوئية. يتم فيها الأكسدة الضوئية للماء، إرجاع مستقبل الإلكترونات، وتركيب الـ ATP.

2- شروط المرحلة الكيموضوئية

شروط المرحلة الكيموضوئية أربعة وهي: ضوء، مستقبل الالكترونات، ADP + Pi، H_2O.

ملاحظة: نسمي هذه الشروط كذلك: شروط عمل التيلاكويد، شروط أكسدة الماء، شروط انطلاق الـ O_2، شروط تركيب الـ ATP، شروط إرجاع مستقبل الإلكترونات.

1- إظهار الشرطين: الضوء ومستقبل الالكترونات

1- تجربة: نحظر معلق من التيلاكويدات ونعرضه تارة للضوء وتارة للظلام، في غياب وفي وجود مستقبل اصطناعي للاكترونات. نختار المستقبل فيروسيانور البوتاسيوم الذي يكون لونه بني محمر في الحالة المؤكسدة، ويتحول لونه إلى الأخضر عندما يستقبل الكترونات (حالة مرجعة).

2- ملاحظة: في وجود الضوء ومستقبل الالكترونات معا يتم انطلاق الـ O_2 ويتحول لون المحلول إلى الأخضر. وفي غياب أحدهما لا يتم انطلاق الـ O_2 ولا يتغير لون المحلول.

3- نتيجة: شروط عمل التيلاكويد: الضوء ومستقبل الالكترونات.

ملاحظة: في التجربة استعملنا مستقبل اصطناعي، ولكن في الصانعة يوجد مستقبل طبيعي.

2- إظهر الشرط: Pi+ADP

1- تجربة: نحظر معلق من التيلاكويدات يحتوي على مستقبل الالكترونات. نعرضه للضوء في غياب وفي جود ADP + Pi.

2- ملاحظة: في غياب ADP + Pi لا يتم انطلاق الـ O_2، وعند إضافتها ينطلق الـ O_2.

3- نتيجة: الـ ADP + Pi شرط لانطلاق الـ O_2 (لعمل التيلاكويد).

3- تفاعلات المرحلة الكيموضوئية

تلخص المرحلة الكيموضوئية في ثلاث (03) تفاعلات:

- أكسدة ضوئية للماء.
- إرجاع مستقبل الالكترونات.
- تركيب الـ ATP: الفسفرة الضوئية.

1- أكسدة ضوئية للماء

في وجود الضوء، يتأكسد الماء وفق المعادلة:



$$H_2O \rightarrow 1/2\ O_2 + 2H^+ + 2\ é$$

وبالتالي جزيئة الماء هي: المصدر الأول للإلكترونات، والـ O_2 المنطلق.

انتقال الالكترونات الناتجة عن الأكسدة الضوئية للماء

تنتقل الإلكترونات الناتجة عن أكسدة الماء في السلسلة التركيبية الضوئية ويستقبلها في الأخير مستقبل للإلكترونات، على الترتيب التالي:

- **مصير الكترونات أكسدة الماء:** تُرجِع النظام الضوئي الثاني PSII المؤكسد ضوئيا، ليسترجع قابلية التنبيه من جديد.
- **مصير الكترونات PSII:** تُرجِع النظام الضوئي الأول PSI المؤكسد ضوئيا، ليسترجع قابلية التنبيه.
- **مصير الكترونات PSI:** تُرجِع المستقبل الأخير للالكترونات $NADP^+$.

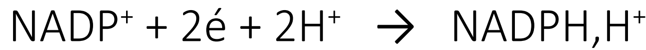
معلومة: نواقل الالكترونات عبارة عن الجزيئات التالية:

الناقل T_1: بلاستوكينون (PG)، الناقل T_2: سيتوكروم bf، الناقل T_3: بلاستوسيانين (PC).



2- إرجاع مستقبل الالكترونات

في وجود الإلكترونات الناتجة عن أكسدة الماء وتوفر البروتونات، يقوم الانزيم NADP ريدوكتاز بإرجاع مستقبل الإلكترونات $NADP^+$ في الحشوة وفق المعادلة:



$$NADP^+ + 2é + 2H^+ \rightarrow NADPH,H^+$$

ملاحظات

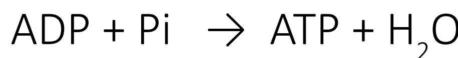
- طبيعيا: مستقبل الإلكترونات هو $NADP^+$.
- تجريبيا: نعوض $NADP^+$ بمستقبل اصطناعي مثل فيروسيانور البوتاسيوم $K_3Fe(CN)_6$.

وبالتالي معادلة الارجاع تختلف وتصبح: $4\ Fe^{+3} + 4é \rightarrow 4Fe^{+2}$

- NADP: نيكوتين أميد ثنائي نكليوتيد فوسفات، يسمى كذلك ناقل البروتونات أو مرافق الانزيم.

3- تركيب الـ ATP: آلية الفسفرة الضوئية

(نص) من جهة، يتأكسد الماء ضوئيا وتتراكم البروتونات (H^+) الناتجة في تجويف الكييس. ومن جهة أخرى، عندما يستقبل الناقل T_2 الالكترون أثناء انتقاله في سلسلة الأكسدة الإرجاعية، فإنه يستعمل طاقته لضخ البروتونات (H^+) كذلك من الحشوة إلى التجويف. وباتالي يصبح تركيز البروتونات في التجويف أكبر من الحشوة فتنتشر عبر قناة موجودة في الانزيم ATP سنتاز لتعديل الفرق في التركيز. تسمح الطاقة المتحررة من سيل البروتونات بفسفرة الـ ADP إلى ATP في وجود الفوسفات اللاعضوي Pi وفق المعادلة:



$$ADP + Pi \rightarrow ATP + H_2O$$

ملاحظة: (سلوك غشاء التيلاكويد تجاه البروتونات)، ينقل البروتونات في الاتجاهين:

- عكس تدرج التركيز: نقل فعال يتطلب طاقة، ويتم عبر الناقل T_2 من الحشوة إلى التجويف.

- حسب تدرج التركيز: انتشار بسيط لا يتطلب طاقة، ويتم عبر الإنزيم ATP سنتاز من التجويف إلى الحشوة.

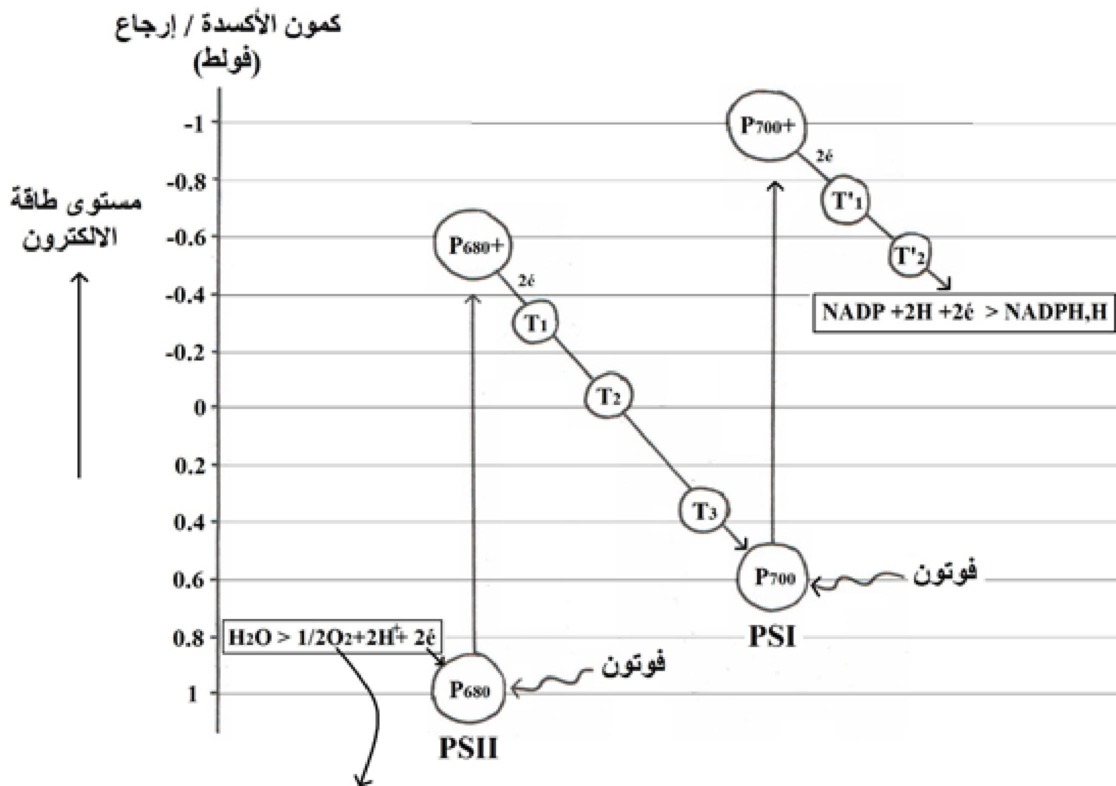
4- آلية انتقال الالكترونات

(نص) تنتقل الإلكترونات في السلسلة التركيبية الضوئية تلقائيا من كمون أكسدة وإرجاع منخفض إلى كمون أكسدة وإرجاع مرتفع:

- من الـ H_2O إلى الـ PSII: تحدث أكسدة ضوئية للماء وينتقل الالكترونين الناتجين إلى الـ PSII تلقائيا من كمون أكسدة وإرجاع منخفض إلى كمون أكسدة وإرجاع مرتفع.

- من الـ PSII إلى الـ PSI: يقتنص الـ PSII الفوتونات الضوئية فيتأكسد ويحرر إلكترونين ينتقلان تلقائيا في نواقل متزايدة كمون الأكسدة والارجاع T_1, T_2, T_3وترجع الـ PSI.

- **من الـ PSI إلى الـ $NADP^+$:** يقتنص الـ PSI الفوتونات الضوئية ويتأكسد كذلك محررا إلكترونين ينتقلان تلقائيا حسب كمون أكسدة وإرجاع متزايد في الناقلين T'_2, T'_1 ، ويستقبلها المستقبل الأخير للإلكترونات $NAADP^+$.

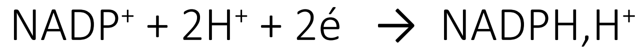


آلية انتقال الإلكترونات في السلسلة التركيبية الضوئية

5- آلية المرحلة الكيموضوئية

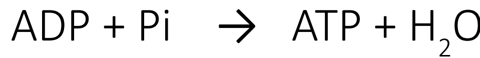
(نــص) تلتقــط الأنظمــة الضوئيــة PSI وPSII الفوتونــات الضوئيــة فتتأكســد ويحــرر كل منهــا إلكترونيــن. يتأكســد الــ H_2O ويطــرح الــ O_2 الناتــج فــي الوســط وترجِــعُ الإلكرونــات الــ $PSII^+$.

تنتقـل الإلكترونـات إلـى PSI^+، ثـم إلـى $NADP^+$ الـذي يرجَـع بواسـطة الانزيـم NADP ريدوكتـاز وفـق المعادلـة:

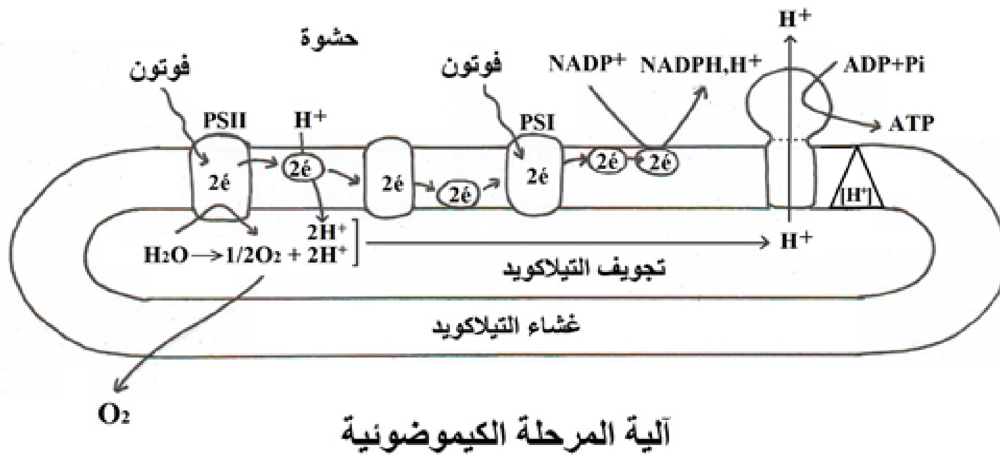


$$NADP^+ + 2H^+ + 2é \rightarrow NADPH,H^+$$

تتراكـم البروتونـات الناتجـة عـن أكسـدة الـ H_2O والتـي يضخهـا الناقـل T_2 مـن الحشـوة أثنـاء انتقـال الإلكتـرون. يصبـح تركيزهـا فـي التجويـف أكبـر مـن الحشـوة فتنتقـل عبـر الـ ATP سـنتاز حسـب تـدرج التركيـز. تسـمح الطاقـة المتحـررة مـن سـيل البروتونـات بفسـفرة الـ ADP إلـى ATP فـي وجـود الفوسـفات اللاعضـوي Pi وفـق المعادلـة:



$$ADP + Pi \rightarrow ATP + H_2O$$



آلية المرحلة الكيموضوئية

ملاحظات

- تفاعلات المرحلة الكيموضوئية متسلسلة ومرتبطة من أكسدة الـ H_2O إلى إرجاع $NADP^+$ وتركيب ATP. وتوقف تفاعل واحد يؤدي إلى توقف المرحلة. لا يتأكسد الـ H_2O ضوئيا إلا إذا تأكسد الـ PSII قبله، ولا يتأكسد الـ PSII إلا إذا تأكسد الـ PSI قبله، ولا يتأكسد الـ PSI إلا إذا توفر مستقبل الإلكترونات.

مثال: إذا ثبطنا أحد نواقل الالكترونات بمادة كيميائية، ستتوقف أكسدة الأنظمة الضوئية، وتتوقف أكسدة الـ H_2O، يتوقف انطلاق الـ O_2، يتوقف إرجاع مستقبل الالكترونات، يتوقف تركيب ATP... وتتوقف المرحلة الكيموضوئية.

- الكلمة كيموضوئية مركبة من كلمتين: كيميائية وضوئية.

كيميائية: يتم فيها إنتاج طاقة كيميائية (مخزنة في جزيئات الـ ATP).

ضوئية: تتطلب وجود الضوء، أو يتم فيها اقتناص الطاقة الضوئية.

7- المرحلة الكيموحيوية

تسمى هذه المرحلة كذلك بحلقة كالفن وبنسون أو مرحلة تثبيت الكربون.

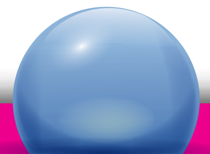
1- تعريف

حلقة كالفن وبنسون هي سلسلة مغلقة من التفاعلات تحدث في الحشوة. يتم فيها تثبيت ثاني أوكسيد الكربون وتركيب الغلوكوز باستعمال نواتج المرحلة الكيموضوئية.

2- شروط

شروط حلقة كالفن وبنسون ثلاثة (03) وهي : CO_2، $NADPH,H^+$، ATP.

ملاحظة: هذه المرحلة لا تشترط الضوء بشكل مباشر، ويمكن أن تحدث في الظلام إذا توفرت شروطها الثلاثة (تجريبيا).





3- الجزيئات الأيضية المتشكلة

بعد تثبيت الـ CO_2، يدمج في خمس (05) جزيئات أيضية وسيطة (مركبات عضوية) على الترتيب التالي:

- المركب الأول: APG (مركب ثلاثي الكربون C_3).
- المركب الثاني: ADPG (مركب ثلاثي الكربون C_3).
- المركب الثالث: PGal (سكر ثلاثي الكربون TP).
- المركب الرابع: غلوكوز (سكر سداسي HP).
- المركب الخامس: RuDip (مركب خماسي الكربون C_5).

ملاحظة: نكشف عن ظهور هذه المركبات بتقنية التسجيل اللوني (الكروماتوغرافيا).

تقنية التسجيل اللوني: الكروماتوغرافيا

التقنية: نضع كمية من الخليط المراد فصل مكوناته على ورق خاص، ونضع الورق شاقوليا في وعاء يحتوي على مذيب عضوي. ينتقل المذيب في الورق بالخاصية الشعرية (يتبلل)، وينقل معه عناصر الخليط بمسافات مختلفة عن البقعة الأصلية حسب وزنها الجزيئي.

نكشف عن المركبات المفصولة بطريقتين: إما بمطابقتها (مقارنتها) بنتائج سابقة معلومة، أو نستعمل الكواشف اللونية (مثل محلول فهلينغ للكشف عن الغلوكوز).

مبدأ التقنية: هجرة مكونات الخليط حسب وزنها الجزيئي.

استعمال التقنية: تستعمل لفصل مكونات المحلول (الخليط).



4- مراحل حلقة كالفن

خمسة (05) مراحل:

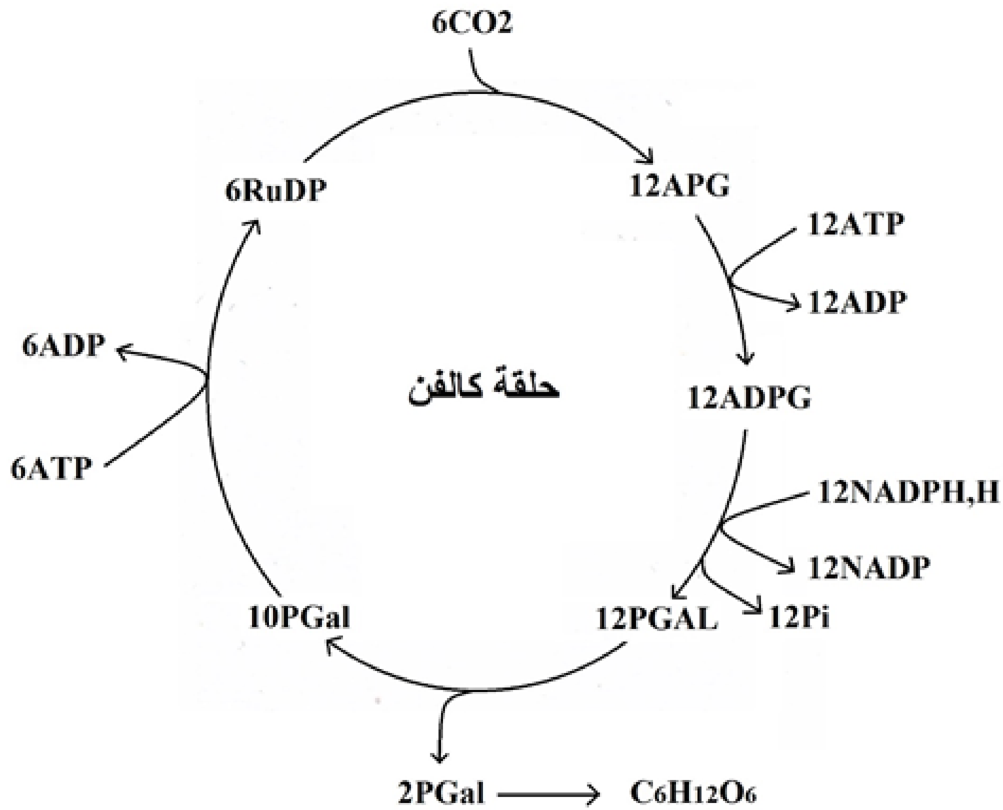
- **تثبيت الـ CO_2:** بواسطة الانزيم Rubisco، يتثبت الـ CO_2 على الـ RuDP ويتشكل مركب سداسي الكربون غير مستقر ينشطر إلى جزيئتين من APG.

- **فسفرة APG:** فسفرة APG إلى ADPG مع إماهة ATP.

- **إرجاع ADPG:** إرجاع ADPG إلى PGal مع أكسدة $NADPH,H^+$.

- **تركيب الغلوكوز:** يستخدم جزء من PGal المتشكل في تركيب الغلوكوز $C_6H_{12}O_6$.

- **تجديد RuDip:** يستخدم جزء آخر من PGal في تجديد RuDP.



ملاحظات

- في جزيئة الغلوكوز ($C_6H_{12}O_6$) المتشكلة خلال حلقة كالفن: مصدر الكربون والأكسجين هو: الـ CO_2. ومصدر الهيدروجين هو: أكسدة الناقل $NADPH,H^+$، والذي اكتسبها من أكسدة الـ H_2O في المرحلة السابقة.

- قدد تتشكل مركبات أخرى من السكر الثلاثي PGal (سكريات، أحماض أمينية، دسم...)، ولكن نعتبر المركب الناتج غلوكوز لتتوازن معادلة التركيب الضوئي مع معادلة لتنفس.

معلومات

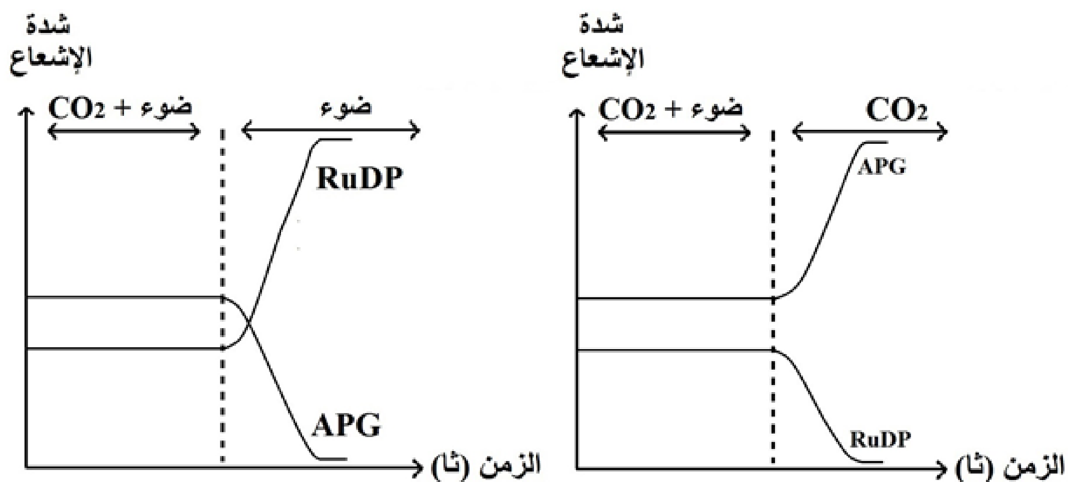
- Rubisco: ريبولوز ثنائي الفوسفات كربوكسيلاز، هو الأنزيم الأكثر وفرة في العالم الحي.

- السكريات الناتجة عن حلقة كالفن تنتقل في النسغ الكامل وتستعمل من طرف النبات، أو تخزن على شكل معقد في أعضاء التخزين.

- النشاء بالنسبة للخلية النباتية مثل الغليكوجين للخلية الحيوانية، كلاهما شكل معقد لتخزين الغلوكوز.

5- العلاقة بين APG وRuDP

1- **تجربة:** الشروط التجريبية والنتائج موضحة في المنحنيين التاليين:



تغير تركيز الـ APG والـ RuDP بدلالة الزمن

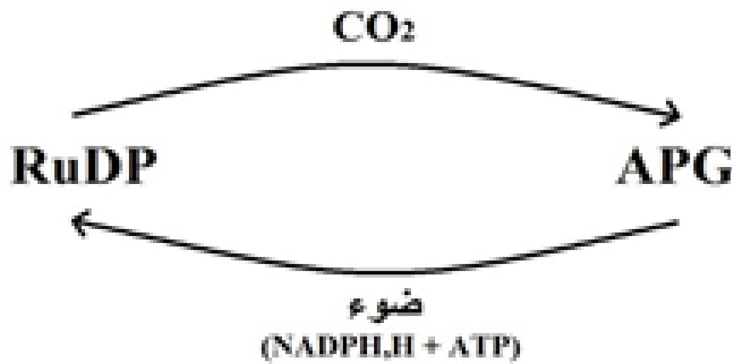
2- تحليل مختصر

- في وجود الضوء و الـ CO_2: تركيز كل من RuDP و APG ثابت.
- في وجود الضوء فقط: تتناقص كمية الـ APG، وتتزايد كمية الـ RuDP.
- في وجود الـ CO_2 فقط: يحدث العكس، تتناقص كمية الـ APG، وتتزايد كمية الـ RuDP.

3- تفسير

- في وجود الضوء والـ CO_2: يتجدد كل من APG وRuDP باستمرار، أي يتحولان إلى بعضهما بشكل حلقي وهو ما يسمى بالثبات الديناميكي.
- في وجود الـ CO_2 فقط: يتشكل APG انطلاقا من RuDP، فيتراكم APG ويستهلك RuDP.
- في وجود الضوء فقط: يحدث العكس، يتجدد RuDP انطلاقا من APG، فيتراكم RuDP ويستهلك APG.

4- استخلاص: يتركب كل من الـ APG والـ RuDP من بعضهما البعض بشكل حلقي، ويتطلب ذلك توفر الضوء والـ CO_2.



العلاقة بين الـ RuDP و الـ APG



8- العلاقة بين مراحل التركيب الضوئي

مرحلتي التركيب الضوئي متكاملتين وتحدثان معا بشكل متواز بحيث:

المرحلة الكيموضوئية تنتج العناصر الضرورية لحدوث المرحلة الكيموحيوية وهي: ATP و$NADPH,H^+$.

المرحلة الكيموحيوية تجدد العناصر اللازمة لحدوث المرحلة الكيموحيوية: ADP + Pi و$NADP^+$.

مثال 1: الضوء شرط لحدوث المرحلة الكيموضوئية فقط، ولكن غيابه يؤدي إلى توقف المرحلة الكيموحيوية (توقف تثبيت الـ CO_2 وتركيب غلوكوز).

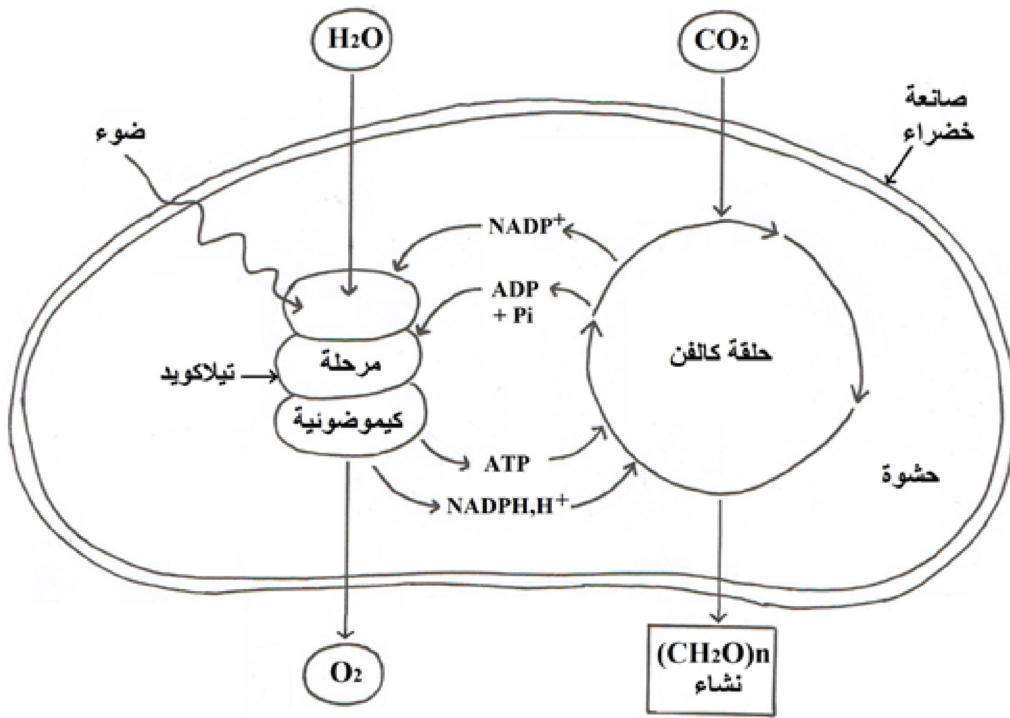
التفسير: الضوء يؤثر بشكل غير مباشر على المرحلة الكيموحيوية، فهو ضروري لحدوث المرحلة الكيموضوئية التي تنتج العناصر الضرورية لحدوث المرحلة الكيموحيوية، تتمثل هذه العناصر في: ATP و $NADPH,H^+$.

مثال 2: الـ CO_2 شرط لحدوث المرحلة الكيموحيوية فقط، ومع ذلك فغيابه يؤدي إلى توقف المرحلة الكيموضوئية.

التفسير: الـ CO_2 يؤثر بشكل غير مباشر على المرحلة الكيموضوئية، فهو ضروري لحدوث المرحلة الكيموحيوية التي تجدد العناصر الضرورية لحدوث المرحلة الكيموضوئية. تتمثل هذه العناصر في: ADP + Pi و $NADP^+$.

ملاحظة: المرحلة الكيموحيوية تبدأ بعد المرحلة الكيموضوئية وتتوقف بعدها. ولكن إذا تم تخزين كمية كبيرة من نواتج المرحلة الكيموضوئية في النهار، سيستمر حدوث حلقة كالفن في الليل.



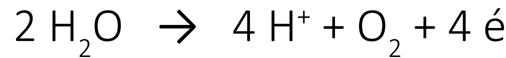


العلاقة بين مرحلتي التركيب الضوئي: الكيموضوئية والكيموحيوية

9- حصيلة التركيب الضوئي

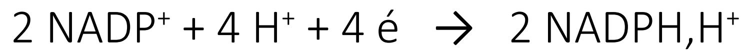
1- حصيلة المرحلة الكيموضوئية

الأكسدة الضوئية لـ H_2O



$$2\,H_2O \rightarrow 4\,H^+ + O_2 + 4\,é$$

إرجاع مستقبل الإلكترونات



$$2\,NADP^+ + 4\,H^+ + 4\,é \rightarrow 2\,NADPH,H^+$$

تركيب الـ ATP



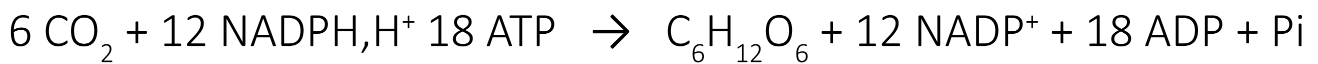
$$n\,ADP + n\,Pi \rightarrow n\,ATP$$

المعادلة الإجمالية



$$2\,H_2O + 2\,NADP^+ + n\,ADP + n\,Pi \rightarrow O_2 + 2\,NADPH,H+ + n\,ATP$$

2- حصيلة المرحلة الكيموحيوية



$$6\,CO_2 + 12\,NADPH,H^+\ 18\,ATP \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 12\,NADP^+ + 18\,ADP + Pi$$

3- الحصيلة الاجمالية



$$6\,CO_2 + 6\,H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2$$

خلاصة
التركيب الضوئي

(نص) التركيب الضوئي، ظاهرة حيوية تحدث في الصانعة الخضراء، تبدأ بامتصاص اليخضور للضوء وتنتهي بتركيب الغلوكوز، تقسم إلى مرحلتين:

مرحلة كيموضوئية: مقرها غشاء التيلاكويد، يتم فيها امتصاص الطاقة الضوئية لإنتاج ATP و$NADPH,H^+$.

مرحلة كيموحيوية: مقرها الحشوة، يتم فيها دمج الـ CO_2 في الجزيئات العضوية الموجودة في الحشوة لتركيب السكريات، وذلك باستعمال نواتج المرحلة السابقة.

إذا، التركيب الضوئي هو:

تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية كامنة في الجزيئات العضوية.

التركيب الضوئي

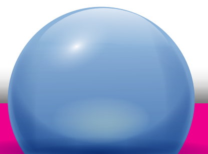
العبارة "تركيب ضوئي" هي اختصار للجملة " تركيب المادة العضوئية في وجود الضوء ".

يوجد الكربون في الطبيعة على شكلين: معدني (CO_2) وعضوي (سكريات).

- يتحول الكربون المعدني إلى كربون عضوي بواسطة عملية التركيب الضوئي، وهو موضوعنا في هذا العدد.

- يتحول الكربون العضوي إلى كربون معدني بواسطة عملية التنفس... في العدد القادم من المجلة إن شاء الله.

الحمد لله رب العالمين، وصلى الله وسلم وبارك على سيدنا محمد وعلى آله وصحبه إلى يوم الدين.



من نفس السلسة



















الأستاذ : بن خريف مصطفى
mustapha.benkherif@gmail.com

